

高速雙體客船船艏波擊負荷模擬與結構強度分析

曾郁安*¹ 李綺芳* 林均達* 林宗岳* 李雅榮**

*財團法人中國驗船中心 研究處
**國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

關鍵詞：高速雙體船，耐海性能，波擊壓力，船艏結構

摘要

本文以一艘長 50 米的高速雙體船為目標船，藉由商用計算流體力學軟體 STAR-CCM+，對目標船在不同規則波頂浪條件和船速下的船體運動及船艏波擊壓力之相對應關係進行研究。文中計算全船耐海性能，並針對船艏波擊壓力進行模擬；對照高速船規範，波擊壓力大致與波高和船速平方成正比關係，驗證計算值的合理性。耐波性能計算結果顯示，波擊壓力極大化對應之波長約為二倍船長，而非船體運動反應極大化的波況條件；此現象應與艏部和波面之相對速度有密切關聯。在結構分析方面，本研究建構船部詳實有限元素模型，於第一水密隔艙壁設定適當之邊界條件，負荷則採用二種方法：規範壓力和前述 CFD 計算之船殼表面之壓力。分析結果指出，外板需有足夠厚度以承受局部波擊壓力，艏部之縱向大肋骨應力最高，多分佈於橫跨甲板處。橫向負荷因雙體船型之特性，內側波擊壓力高於外側，產生水平分裂力，因而致使橫向肋骨應力集中於船體和橫跨甲板連接處。整體來說，CFD 負荷相較於規範值保守，計算指出結構應力集中處可作為未來結構強化之依據。

研究背景

在國內造船技術的發展上，高速雙體船的開發一直是重要的一環，在快速船的開發上，除了船型的研發外，由於速度的增快，雙體船因波浪激發之運動所造成的運動、耐海性問題，更是各先進國家在開發雙體船時不能迴避的重要課題。具有高速、高穩定性、較大艙容空間與甲板等特點，是雙體船被廣泛應用的原因，相較於同樣噸位的單體船，其細長的船體使得阻力也相對較小。但當海面風浪較大時，船體起伏與縱搖運動容易引發船艏波擊的現象，使船艏結構發生損傷，限制了雙體船適航條件。為了追求更好的耐海性能與結構穩定，許多學者投入研究在評估高速雙體船船艏波擊特性的方法。2016 年塔斯馬尼亞大學[1]提出一套用來量測評估雙體船船艏波擊的實驗方法，實驗中截取雙體船船艏部分作為量測體，測量其等速垂直落下於實驗水池時，船艏受力與壓力的變化，並以 CFD 數值模擬方法與實驗值相互驗證。

本文以一艘長 50 米的鋁合金高速雙體船為目標船，藉由商用計算流體力學軟體 STAR-CCM+，對目標船在不同規則波頂浪條件和船速下的船體運動及船艏波擊壓力之相對應關係進行計算模擬，並對

照 CR 以及 DNV-GL 高速船規範，驗證其計算值的合理性。在結構分析方面，本研究建構船部詳實有限元素模型，於第一水密隔艙壁設定適當之邊界條件，負荷則採用二種方法：規範壓力和上述 CFD 計算之船殼表面之壓力，由此對結構模型進行應力分析，觀察船艏元件所受應力及其結構強度是否與規範值相符合。

計算模型與設定

本章節將介紹選用之目標船計算模型幾何參數，以及進行目標船頂浪耐海性能模擬試驗時所採用的 CFD 設定與有限元素模型。

1. 目標船模型幾何參數

表 1: 目標船全船模型幾何參數

垂標間距 [m]	45
排水量 [tonne]	340
水線寬度 [m]	13.18
吃水 [m]	1.8
定傾高度 [m]	19.20
設計船速 [knot]	39.2

¹ 曾郁安 (yatzen@crclass.org)

表 1 為目標船計算模型幾何參數，計算上採用全船模型進行。依據原廠提供之線型圖，再利用 3D 曲面建構軟體 Rhinoceros 所繪製的目標船全船模型，如圖 1 所示。

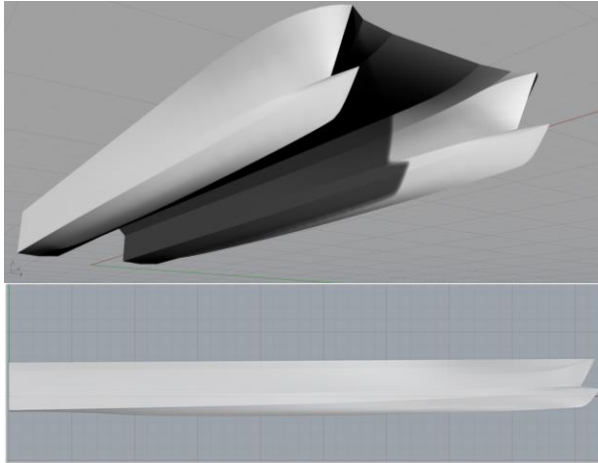


圖 1：目標船全船模型示意圖

2. CFD 計算條件設定

為準確模擬波擊現象時目標船艙的壓力與受力，本研究採用商用計算流體力學軟體 STAR-CCM+，以 RANS 方法，對目標船在不同規則波頂浪條件和船速下的船體運動及船艙波擊壓力與受力進行模擬計算，模擬的規則波頂浪條件與相對應的船速如表 2 所示，模擬條件上分別針對目標船在低速大浪、高速、中速以及中速長波等四種各別情況進行模擬。

表 2 模擬的規則波頂浪條件與相對應的船速

No.	船速 [knots]	波頻 [rad/s]	波高 [m]	波長 [m]
Test.1	25.5	0.85	4.5	85.3
Test.2	39.2	0.85	3.0	85.3
Test.3	30.4	0.85	3.0	85.3
Test.4	30.4	0.75	3.0	109.6

計算上採用 $k-\epsilon$ 紊流模型，以流體體積法 (Volume of Fraction, VoF) 追蹤流體界面，並利用暫態求解器(transient state solver)進行求解，運動自由度則開啟起伏與縱搖，圖 2 為目標船於頂浪中的運動模擬示意圖。

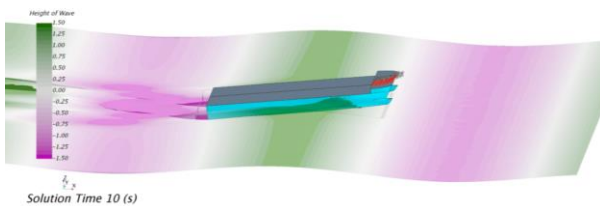


圖 2 目標船於頂浪中的運動模擬示意圖

3. CFD 邊界條件與網格設定

由於計算上船型及模擬條件為左右對稱，在邊界條件的設定上採半船設定，並於中央處進行對稱，計算域邊界條件的設定如圖 3 所示。位於船體前方之波浪入流平面及船體側方平面採用速度入流 (velocity inlet) 條件；船體後方平面採用壓力出口 (pressure outlet) 條件；計算域上下壁面採用光滑壁面 (slip wall) 條件；船體表面則採用無滑移壁面條件。

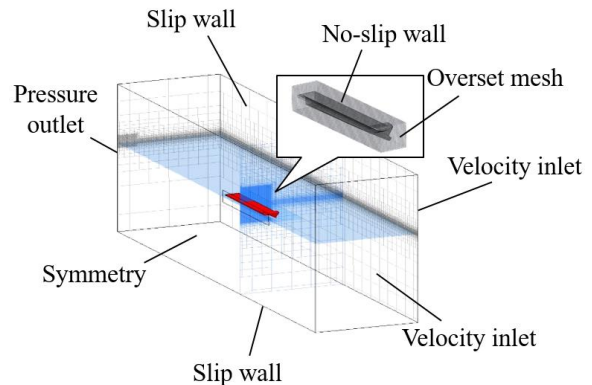


圖 3 邊界條件示意圖

本研究在船舶於頂浪下的運動模擬上採用重疊網格法(Overset Mesh)，並於波浪作用範圍及船體運動範圍進行網格細化，總網格數約為一千萬，網格佈置如圖 4 所示。

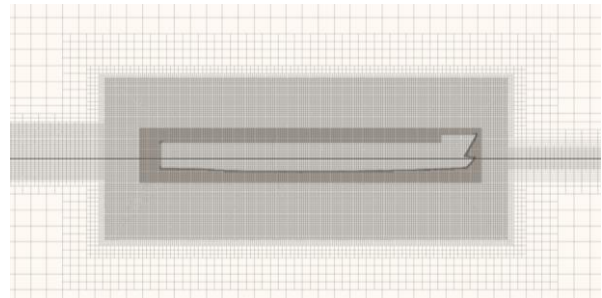


圖 4 網格佈置示意圖

4. CFD 波擊壓力與受力量測設定

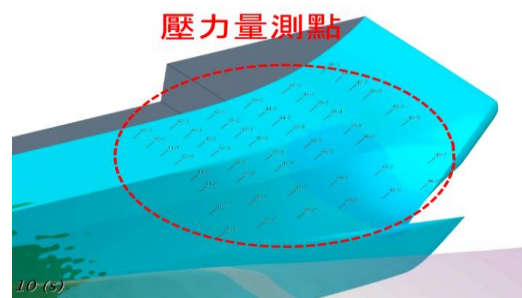


圖 5 船舶壓力量測點示意圖

為量測目標船於波擊現象中船艙的壓力及受力，以便進行後續船艙結構的分析，模擬上設定目標船船艙範圍為從船長 42 公尺處(距 AP 位置)至船體最前緣之間的部分，並於此部分佈置壓力量測點，如圖 5 所示。量測此部分於波擊現象中壓力與垂向受力隨時間的變化。

5. 艙部結構描述

本研究僅針對艙部結構進行分析，艙部從 Fr.35(距 AP 位置 42 公尺處)至 Fr.40(船體最前緣)，模型採用板元素，包含三邊形及四邊形，元素大小約為 300x300mm²，以及樑元素。艙部模型共 8202 個節點、12616 個元素；其中板元素為 9500 個、樑元素為 3116 個。邊界條件設定為在 Fr.35 中心線上的節點六向自由度皆受到約束，而 Fr.35 上的其他節點在 Tx、Tz、Ry 受到約束，結構模型與邊界條件如圖 6、圖 7 及表 3。

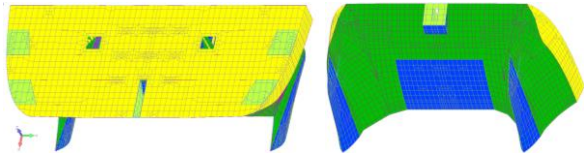


圖 6 艙部結構模型

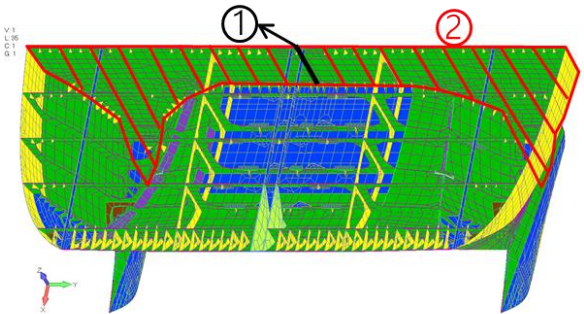


圖 7 艙部結構模型與邊界條件

表 3 艙部結構模型邊界條件

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
1	Fixed					
2	Fixed	Free	Fixed	Free	Fixed	Free

結果與討論

本章節將就 CFD 所計算的船艙波擊受力以及結構分析的結果與中心規範進行驗證。

1. 設計波擊壓力與船速-波高的關係條件

目標船船艙於波擊現象中，船艙壓力量測點所量測之最大壓力峰值與船艙部分垂向受力最大值的計算結果如表 4 所示。

對照本中心高速船規範中設計波擊壓力估算公式中：

$$a_{cg} = \frac{7.6\tau \times 10^{-6}}{d \cdot C_b} (12H_{1/3} + B_w)(50 - \beta_{cg}) \left(\frac{V}{\sqrt{L_w}}\right)^2 \quad (1)$$

式中 $H_{1/3}$ 為有義波高、 V 為船速、 a_{cg} 為船舶重心處之百分之一最大加速度平均值，可知船體重心加速度與有義波高及船速的平方成正比關係，而設計波擊壓力的估算便是由此船體重心垂向加速度再乘以相關定常係數得到，由此可推測高速船規範中設計波擊壓力會正比於波高與船速平方的乘積。

為驗證上述之推測，表 5 中將 Test.1~Test.4 的量測點壓力峰值與其波高與船速平方的乘積進行相互比對，為方便進行比對，數值上以比值的方式表示，比值以 Test.1 的結果為基礎，其中除 Test.2 壓力峰值較小以及 Test.4 比值結果可能因波浪頻率不同而不相符外，其餘比值皆與 $H \cdot V^2$ 的比值關係相符合，驗證了計算值的合理性。此結果也表明不同波浪頻率之間的船艙波擊壓力峰值關係無法以 $H \cdot V^2$ 的比值表示。

而觀察目標船船艙最大垂向受力值，其與量測點壓力峰值也無絕對的關係，以 Test.2 的結果來說，其量測壓力峰值在四種情況中最大，但船艙最大垂向受力值卻是四者中第二小的，此原因與船體的運動反應及船艙的壓力分佈有關，同樣也不適用 $H \cdot V^2$ 的比值關係。四種模擬情況下船艙垂向受力值最大時的壓力分佈如圖 8 所示，可看出 Test.2 雖然當下壓力峰值在四種情況中最大，但僅集中在船艙前端。

目標船起伏(Heave)及縱搖(Pitch)單位振幅反應值計算的結果如表 6 所示，計算結果中顯示波擊壓力極大化(Test.2)對應之波長約為二倍船長，而非船體運動反應極大化的波況條件(Test.4)；此現象應與艙部和波面之相對速度有密切關聯。

表 4: 船艙波擊壓力與受力計算結果

No.	船速 [knots]	波高 [m]	量測點壓力峰值 [kPa]	垂向受力最大值 [kN]
Test.1	25.5	4.5	126.7	992
Test.2	39.2	3.0	172.3	506
Test.3	30.4	3.0	126.2	716
Test.4	30.4	3.0	97.2	328

表 5: 四種壓力模擬結果與 $H \cdot V^2$ 的比值關係

No.	Test.1	Test.2	Test.3	Test.4
量測點壓力峰值比值	1.267	: 1.722	: 1.261	: 0.972
$H \cdot V^2$ 比值	1.267	: 1.996	: 1.200	: 1.200

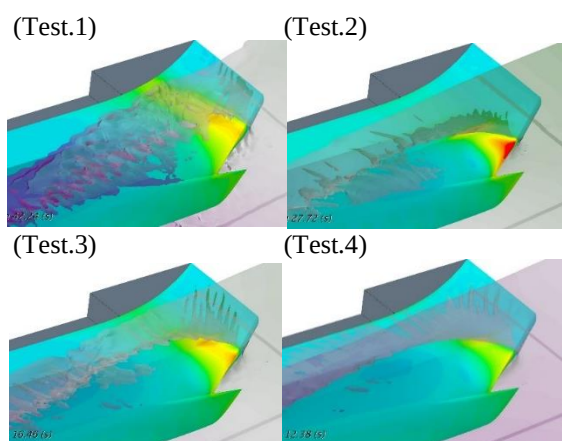


圖 8：船舶垂向受力值最大時的壓力分佈

表 6: 目標船起伏及縱搖單位振幅反應值

No.	船速 [knots]	波高 [m]	Heave RAO [m]	Pitch RAO [deg]
Test.1	25.5	4.5	0.837	3.072
Test.2	39.2	3.0	0.786	2.827
Test.3	30.4	3.0	0.882	3.337
Test.4	30.4	3.0	1.234	3.545

2. 結構規範壓力

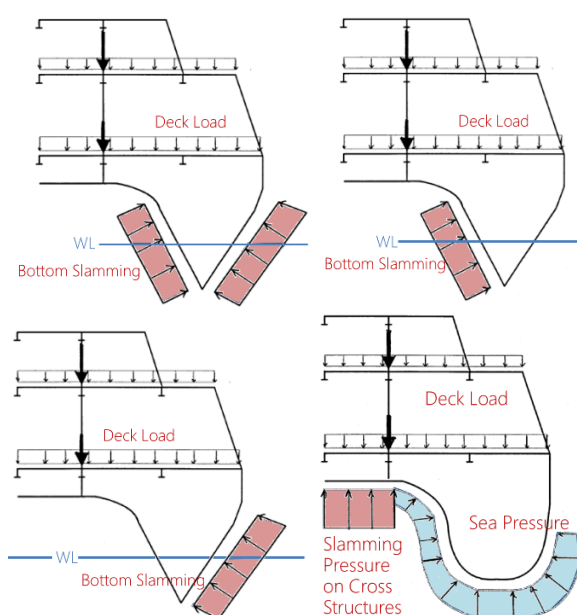


圖 9 波擊負載條件：LC2 對稱型底部波擊(左上)；LC3 不對稱型底部波擊(右上)；LC4 不對稱型底部波擊(左下)；LC5 橫跨結構波擊(右下)

規範壓力採用 DNV 規範之波擊負荷。在規範中定義了四種 Load Case，分別為施加於船殼處的對稱型底部波擊、2 種不對稱型底部波擊及施加於橫跨結構處橫跨結構波擊，如圖 9。施加方式為分別於

各個橫肋號施加波擊負荷，當該橫肋號施加波擊負荷，其餘部位則施加海水壓力，如圖 10。而施加的波擊負荷值則與施加負荷的面積大小相關，各個負荷條件的波擊負荷值列於表 7；海水壓力則和位於水線之上或之下以及與水線距離 h_0 相關，海水壓力值列於表 8。而該船使用之材料為鋁合金 5083-H321，同樣根據 DNV 規範，可得容許應力為 108 N/mm^2 。

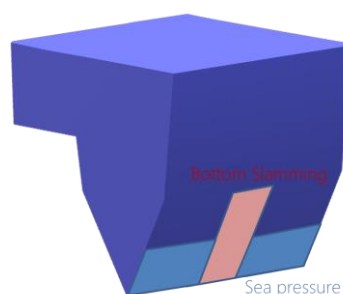


圖 10 負荷施加方式示意圖

表 7 DNV 規範波擊負荷值

Load Case	Slamming Area	Load Area	P[Btm]	P[Crs]
		m ²	kN/m ²	kN/m ²
LC2 對稱型 底部波擊	Fr.35-36	10.875	30.944	-
	Fr.36-37	9.479	32.470	-
	Fr.37-38	9.756	32.143	-
	Fr.38-39	5.638	39.164	-
LC3 內側 不對稱型 底部波擊	Fr.35-36	4.225	43.500	-
	Fr.36-37	4.359	43.011	-
	Fr.37-38	4.731	41.749	-
	Fr.38-39	3.401	47.023	-
LC4 外側 不對稱型 底部波擊	Fr.35-36	5.195	40.351	-
	Fr.36-37	5.118	40.572	-
	Fr.37-38	6.546	37.092	-
	Fr.38-39	4.622	42.103	-
LC5 橫跨結構 波擊	Fr.35-36	7.807	-	53.100
	Fr.36-37	8.085	-	52.545
	Fr.37-38	8.888	-	51.073
	Fr.38-39	10.949	-	47.976
	Fr.39-40	7.982	-	52.748

表 8 DNV 規範海水壓力值

below design waterline		above design waterline	
h0	Sea pressure	h0	Sea pressure
m	kN/m ²	m	kN/m ²
0	27.468	0	27.468
1.8	40.668	3.565	6.965

根據以上 Load Case 得到之計算結果如下，表 9 整理出各 Load Case 板元素及樑元素之應力極值與編號，可以發現分析結果皆低於容許應力，其中應力極值最大發生在 LC5 波擊力施加於 Fr.38-39 的條件時，該元素位於 Fr.38 處之右舷縱向大肋骨腹板，距甲板約 350mm。而圖 11 至圖 14 顯示各 Load Case 之板元素應力值分析結果。

表 9 DNV 規範分析結果

Load Case	Slamming Area	板元素		樑元素	
		極值	編號	極值	編號
LC2 對稱型 底部波擊	Fr.35-36	27.902	10316	57.223	9917
	Fr.36-37	30.861	8478	54.120	9665
	Fr.37-38	28.962	2454	44.643	3846
	Fr.38-39	29.372	9623	42.034	3768
LC3 內側 不對稱型 底部波擊	Fr.35-36	41.187	3649	77.665	9617
	Fr.36-37	37.151	3649	69.146	3702
	Fr.37-38	40.895	12080	54.254	3734
	Fr.38-39	49.458	5331	47.367	9716
LC4 外側 不對稱型 底部波擊	Fr.35-36	37.767	8478	70.183	9917
	Fr.36-37	41.427	8286	60.933	9895
	Fr.37-38	34.788	2823	49.986	3768
	Fr.38-39	44.297	5428	49.581	3768
LC5 橫跨結構 波擊	Fr.35-36	78.733	12703	57.458	12022
	Fr.36-37	61.630	12354	64.523	3575
	Fr.37-38	55.151	12328	68.505	9530
	Fr.38-39	84.947	11992	77.177	9432
	Fr.39-40	54.608	3404	61.008	2554

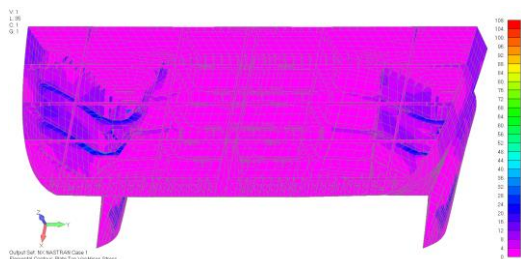


圖 11 LC2 Fr.36-37 板元素應力值

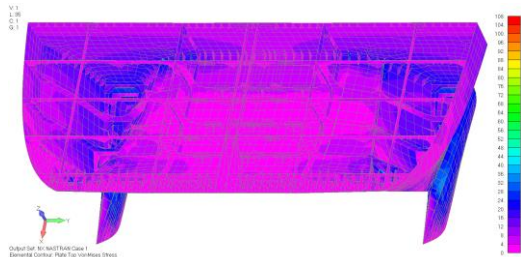


圖 12 LC3 Fr.38-39 板元素應力值

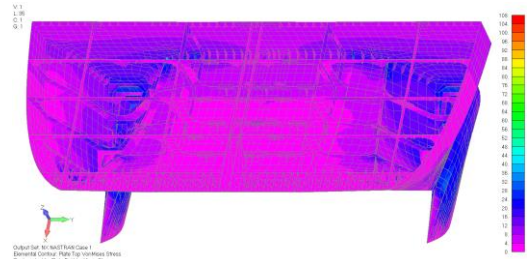


圖 13 LC4 Fr.38-39 板元素應力值

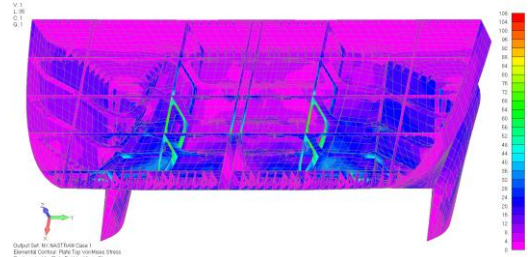


圖 14 LC5 Fr.38-39 板元素應力值

3. Test.1 與 Test.3 的壓力映射結構分析

將 CFD 計算之船殼表面壓力直接映射至結構模型上進行單向流固耦合，壓力映射的結果如圖 15 及圖 16 所示，左邊圖示為 STAR-CCM+計算 Test.3 與 Test.1 垂向受力最大時之壓力分佈的結果，右邊圖示為此壓力映射至結構上的結果，可以看到壓力分佈十分符合，唯獨壓力的峰值因為網格大小的差異而被平均掉。

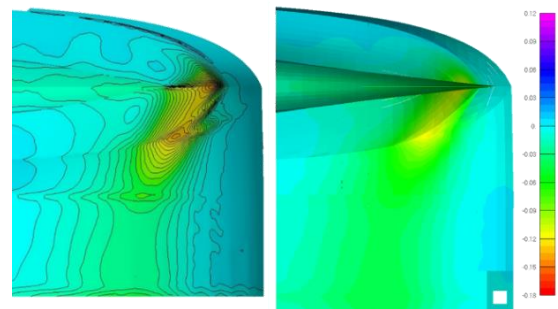


圖 15 結構施加 Test.3 壓力分佈後的映射結果比較

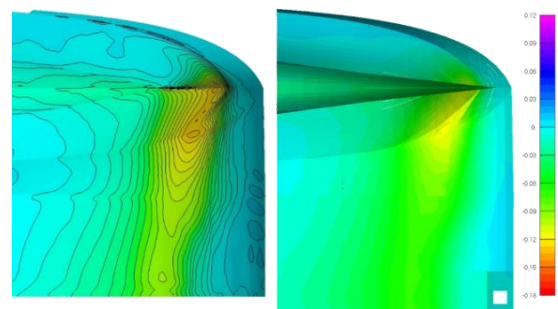


圖 16 結構施加 Test.1 壓力分佈後的映射結果比較

單向流固耦合得到之計算結果如下，表 10 整理出板元素及樑元素之應力極值與編號，而圖 17 及圖 18 顯示兩條件下之板元素應力值分析結果，若同樣以 DNV 規範之容許應力 108 N/mm^2 來檢核，可以發現在 Test.3 時應力皆符合容許應力，然而在 Test.1 時數個元素超出容許應力，超出容許應力的元素位於縱向大肋骨及船體和橫跨甲板連接處之角隅，其中板元素應力極值之元素位於 Fr.37 之前 100mm、底板之上 300mm 之縱向大肋骨角隅處之腹板，應力值高達 120 N/mm^2 ，而樑元素應力極值之元素位於 Fr.37 之後 100mm、底板之上 400mm 之縱向大肋骨角隅處之面板，應力值高達 122 N/mm^2 ，應力皆超出容許應力許多。

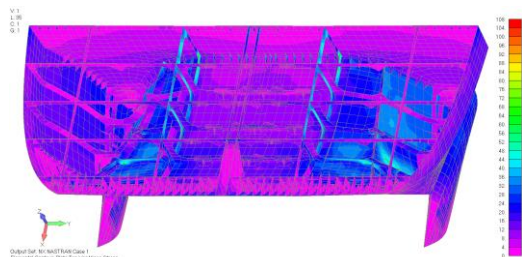


圖 17 Test.3 條件下之板元素應力值

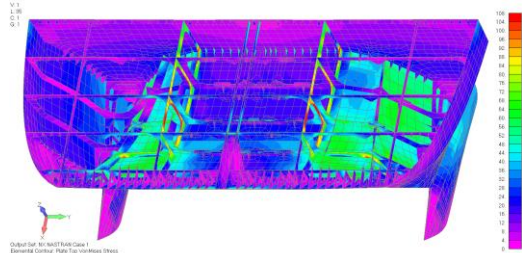


圖 18 Test.1 條件下之板元素應力值

表 10 單向流固耦合分析結果

Load Case	板元素		樑元素	
	極值	編號	極值	編號
Test.3 條件下	65.154	12523	81.268	9531
Test.1 條件下	120.193	9328	121.963	3426

結論

本研究針對五十米目標船在不同規則波頂浪條件和船速下的船體運動及船艏波擊壓力之相對應關係進行研究。上述文中分別針對船艏部分進行壓力與受力的量測，並對照本中心高速船規範，Test.1~Test.3 所計算的波擊壓力大致與 $H \cdot V^2$ 成正比例關係，驗證其計算值的合理性。耐波性能計算結果顯示，波擊壓力極大化對應之波長約為二倍船長，非船體運動反應極大化的波況條件；此現象應與艏部和波面之相對速度有密切關聯。

結構分析方面，本研究針對結構損壞的艏部進行結構分析，以 DNV 規範以及 CFD 壓力映射做為施加之外力，並假設第一水密隔艙壁為準剛性。計算結果顯示船艏結構強度符合 DNV 規範，然而在直接計算法有多處不符合，因此推斷 DNV 規範以逐肋序校核且沒有綜合不同 Load Case 之條件可能不妥當，有低估整體負荷之虞。而以直接計算法可確實反應波擊力特性，波擊力同時包含垂向負荷、橫向負荷及局部壓力，在模型中外板有足夠厚度以承受局部波擊壓力；橫向負荷因雙胴體船型之特性，內側波擊壓力高於外側，產生水平分裂力，因而使橫向肋骨應力集中於船體和橫跨甲板連接處；而垂向負荷主要分佈於橫跨甲板處，因而使艏部之縱向大肋骨應力最高。整體來說 CFD 負荷相較於規範值保守許多，計算指出結構應力集中處可作為未來結構強化之依據。

參考文獻

1. Catamaran Wetdeck Slamming – A Numerical and Experimental Investigation, Ahmed Abdelwahab Swidan, Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy University of Tasmania, June 2016.
2. Rules for classification: High speed and light craft — DNVGL-RU-HSLC Pt.3, January 2018.
3. DNV Classification Notes No. 30.8 Strength Analysis of Hull Structures in High Speed and Light Craft, August 1996.

BOW SLAMMING SIMULATION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF HIGH SPEED PASSENGER CATAMARAN

Tzeng, Yu-An Lee, Chi-Fang* Lin, Chun-Ta* Lin, Tsung-Yueh* Lee, Ya-Jung***

*Research Department, CR Classification Society

** Department of Engineering Science and Ocean Engineering,
National Taiwan University

Keywords: High-speed catamaran, Seakeeping, Slamming pressure, Bow structure

ABSTRACT

In this paper, a 50-meter high-speed catamaran is analyzed through the commercial CFD software Star-CCM+ and FEM software Femap with NX Nastran. The relationship between the ship motion and the bow slamming pressure under different regular waves and ship speeds in head sea is studied. Compared with the high-speed craft rules of CR, the wave pressure is approximately proportional to the wave height and the square of the ship's speed, which verifies the results. The CFD results show that the wavelength corresponding to the maximum of the wave pressure is about twice the ship length, instead of the wave conditions that maximize the motion response. This phenomenon should be closely related to the relative velocity of the bow and wave surface. On the aspect of structural response to bow and cross-deck slammings, this study constructs a detailed finite element model of the bow section. An appropriate boundary condition is set on the first watertight bulkhead, and two methods are used for the load: the pressure specified by the rules and the pressure on the hull surface computed by the aforementioned CFD. The FEM results indicate that the thickness of outer plates is sufficient to withstand local wave pressure; the horizontal load of inner and outer parts of the demihull generates split force at the conjunction of demihull and cross deck, therefore stress concentrates on the connections of the transverse web; the vertical load is mainly distributed on cross deck, so that the stress of longitudinal frame is the highest. Overall, the CFD load is conservative compared to the rules load, and the hot spots indicated by the calculation can be used as the basis for future structural strengthening.